

数値極限解析を用いた液状化の局所性を考慮した地盤の支持力特性

忽那, 惇
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻

善, 功企
九州大学大学院工学研究院

陳, 光斉
九州大学大学院工学研究院

笠間, 清伸
九州大学大学院工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/21968>

出版情報：土木学会地震工学論文集．29，pp.331-335，2007-08．公益社団法人土木学会
バージョン：
権利関係：



数値極限解析を用いた液状化の 局所性を考慮した地盤の支持力特性

忽那 惇¹・善 功企²・陳 光斉³・笠間 清伸⁴

¹九州大学大学院工学府建設システム工学専攻(〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地ウエスト 2 号館 11 階)

²九州大学教授 大学院工学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地ウエスト 2 号館 11 階)

³九州大学助教授 大学院工学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地ウエスト 2 号館 11 階)

⁴九州大学助手 大学院工学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地ウエスト 2 号館 11 階)

本研究では、液状化強度のばらつきをランダム場理論で表現し、数値極限解析を用いたモンテカルロ・シミュレーションを行うことで、液状化の局所性を考慮した地震時における液状化地盤の支持力解析を行った。その結果を用いて、液状化部の割合が支持力係数および破壊モードに与える影響について、確率統計的に考察した。得られた結論をまとめると以下になる。1)局所的な液状化を考慮した地盤において、水平震度および液状化部の割合が増加すると、地盤の支持力は大きく減少する。2)地震時および液状化時の地盤の支持力係数は、対数正規分布で近似できる。3)液状化の局所化のパターンは、液状化時の地盤の支持力および破壊モードに大きな影響を与える。

Key Words : Numerical Analysis, Seismic Bearing Capacity, Liquefaction, Spatial Variability

1. はじめに

地盤の液状化対策の一つに、事前混合処理や浸透固化処理のように地盤に固化材や薬液を混合・注入して地盤を固化する工法が開発されている。実際に施工された固化処理地盤では地盤の不均質性や混合の不均一性などの要因によって、液状化強度に空間的なばらつきが生じることが報告されている。例えば、固化処理地盤の一軸圧縮強度の変動係数は、0.14～0.99 と報告されている^{1) 2)}。また、空間的な変動を表わす鉛直および水平方向の自己相関係数は、0.15～12m と自然堆積地盤に比べてかなり小さい。地盤の液状化強度に空間的なばらつきが存在する場合には、地震時において液状化強度の小さい箇所が先に液状化してしまう可能性がある。つまり、液状化強度のばらつきの程度が大きい固化処理地盤では液状化に局所性が存在することとなり、地震時における固化処理地盤の支持力や、破壊モードの決定に影響すると予想される。そこで本研究では、地盤の局所的な液状化を想定し

て、液状化強度の空間的なばらつきをランダム場理論で表現し、数値極限解析を使ったモンテカルロ・シミュレーションにより、液状化の局所性を考慮した地震時における支持力解析を行った。その結果を用いて、液状化部の割合が支持力係数および破壊モードに与える影響について、確率統計的に考察した。

2. 解析概要

本研究では、地盤の支持力を数値解析的に求める手法として、数値極限解析(Numerical Limit Analyses, NLA)³⁾を用いた。数値極限解析は、上界数値極限解析と下界数値極限解析からなり、地盤を剛塑性体と仮定し、有限要素法と同様に各メッシュの節点の変数を離散化した後、上界定理と下界定理を利用して、変形を受けたさいの地盤の内部消散仕事は、最小(最大)となるときの変数を線形計画法によって求める解析手法である。

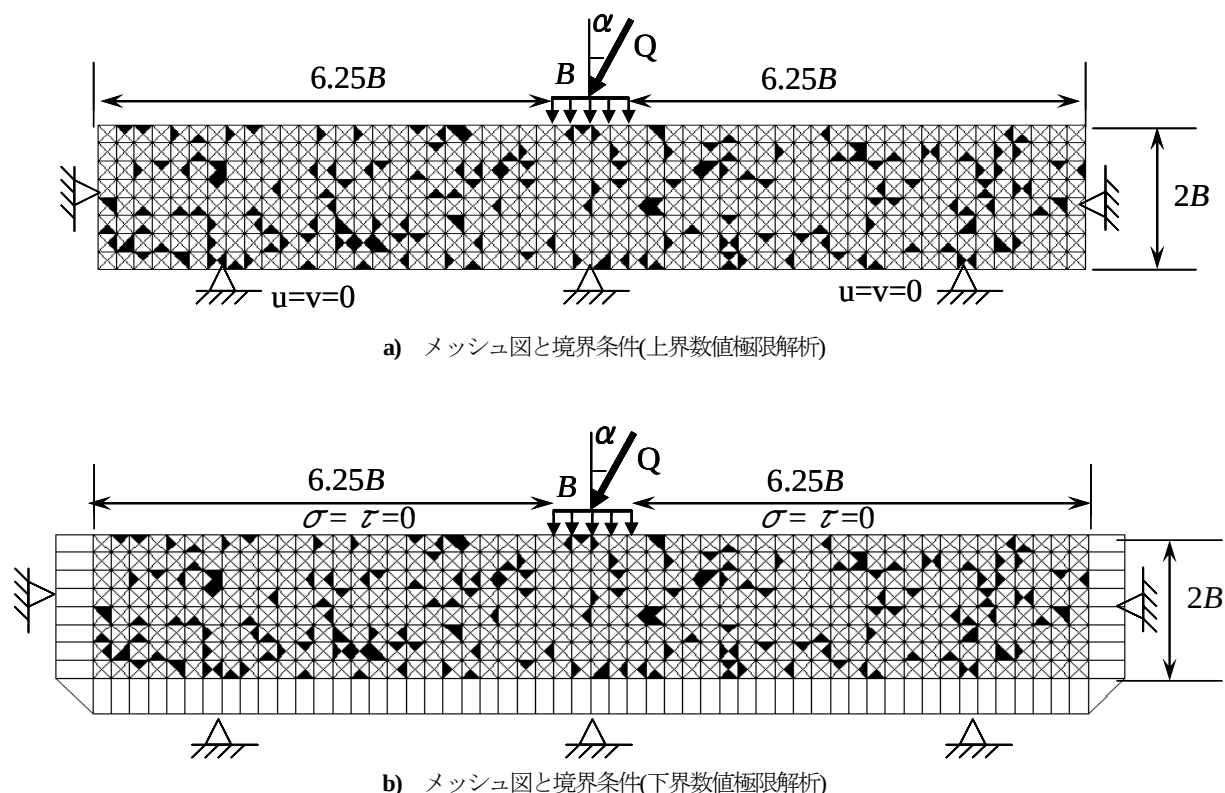


図-1 解析メッシュ図と境界条件(液状化率 10%, 液状化部を黒で表示)

数値極限解析の特徴として、

- 1) 支持力の正解値は、上界・下界数値極限解析から得られる上限値と下限値で挟まれる区間内に存在する解として得られる。
- 2) 線形計画法により、自動的に最適な破壊モードを計算する。
- 3) 粘土地盤の支持力をプラントルの支持力式と比較して $\pm 5\%$ の精度で計算できる⁴⁾。砂質土地盤 ($c=0$) の支持力も同様に計算でき、これまでに提案されている支持力式との比較をしている⁵⁾。
- 4) 解析に必要な定数が、せん断強度に関する定数 (c, ϕ) のみであることなどがある。

本研究で使った解析メッシュ図(液状化率 10%)と境界条件を図-1 に示す。図-1 で塗りつぶした要素が液状化を想定した要素であり、液状化率とは、液状化部の全地盤に対する体積比率である。図-1 a) に上界数値極限解析、図-1 b) に下界数値極限解析による 1 例の図を示す。基礎となる要素を地盤中央にはり要素として設置した。载荷は、平板载荷試験と同様な条件を想定し、さらに地震時の基礎にかかる慣性力を考慮するために、鉛直方向と角度 α をなす傾斜荷重を想定している。また、基礎と地盤の境界の強度は、地盤の粘着力成分によって抵抗すると

表-1 液状化地盤の解析ケース

粘着力 c (kPa)	0
単位体積重量 γ (kN/m ³)	10
改良部の内部摩擦角 ϕ_1	30°
液状化部の内部摩擦角 ϕ_2	0°
水平震度 k_h	0, 0.1, 0.2, 0.3
液状化率 (%)	0, 5, 10, 15

した。基礎幅 B を基準に、地盤の深度を $2B$ 、幅を左右にそれぞれ $6.25B$ とした。また、メッシュの寸法は $0.25B \times 0.25B$ とし、図のようにその正方形メッシュ内部を 4 分割して三角形要素を考えた。図中の黒い三角形の部分は液状化部を示している。要素数は 1,728、節点数は 5,184 となった。

表-1 に、液状化地盤における解析条件を示す。今回の解析では、液状化の局所性を表現するため、液状化しない要素(改良部)と液状化する要素(液状化部)の 2 つに単純化してモデル化し、改良部の内部摩擦角 $\phi_1=30^\circ$ とした。液状化部のせん断強度を $\tau=\sigma' \tan \phi_2=0$ とするため、便宜

論文

上解析では $\phi_2=0^\circ$ とした。液状化する要素の配置の決定は、乱数を用いてランダムに決定した。水平震度を $k_h=0$ ～0.3 まで、液状化率を 0～15%まで変化させ、各ケースで液状化部の配置の異なる 100 個の解析条件を作成し、モンテカルロ・シミュレーションを行った。本来、水平震度が増加すると液状化率も増加すると考えられるが、本論文では独立として計算した。

今回の解析では、液状化部のモデル化を非常に単純化させたが、今後は、地震応答解析を行い、地盤の液状化の程度に応じて、地盤の強度を低減させる手法へと発展させる必要があると考えている。

3. 解析結果および考察

図-2 に、水平震度なし($k_h=0$)、液状化率 10%における、モンテカルロ・シミュレーションを行った解析回数と、平均支持力係数 μ_{Nr} 、標準偏差 σ_{Nr} の関係を示す。解析回数がおおよそ 80 回を超えると、それぞれの変動幅が次第に減少する。解析回数 100 で平均値と標準偏差が収束していると判断し、100 回における値を用いて、次式より支持力係数の統計値を計算した。

$$\mu_{N_r} = \frac{\sum_{i=1}^{100} N_{r_i}}{100}, \quad \sigma_{N_r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{100} (N_{r_i} - \mu_{N_r})^2}{100-1}} \quad (1)$$

ここで、支持力係数 N_{r_i} は i 回目のモンテカルロシミュレーションによる支持力係数である。 N_r は、数値極限解析によって得られた極限支持力 q_f を、次式で示される Terzaghi の式⁹⁾より求めた。

$$N_r = \frac{2q_f}{\gamma B} \quad (2)$$

液状化時の支持力係数の分布を評価するため、図-3 に、 $k_h=0$ 、液状化率 10%における、支持力係数のヒストグラムを示す。 χ^2 検定の、5%の危険率で対数正規分布に適合した。図中には、統計値から推定した対数正規分布を示しており、統計値を用いて推定した 95%信頼性上限値と下限値もそれぞれ示している。

液状化による支持力の低減を評価するため、図-4 に、水平震度なし($k_h=0$)における支持力低減率と液状化率の関係を示す。支持力低減率は、各水平震度での鉛直支持力を、平常時の支持力で除して正規化した値で、【低減率(%)=100-{支持力($k_h \neq 0$)/ 支持力($k_h=0$)} × 100】と計算した。つまり、100%の低減率のときに、支持力がゼロになることを意味する。また、低減率は、モンテカルロ・シミュレーションより得られた平均値、対数正規分布と仮定し

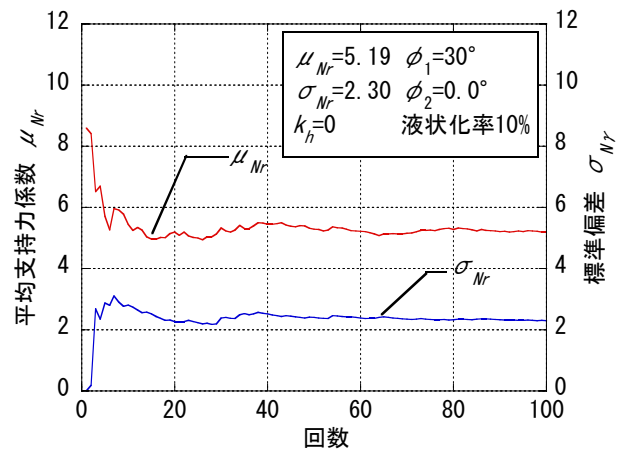


図-2 解析回数と平均支持力係数・標準偏差の関係
($k_h=0$, 液状化率 10%)

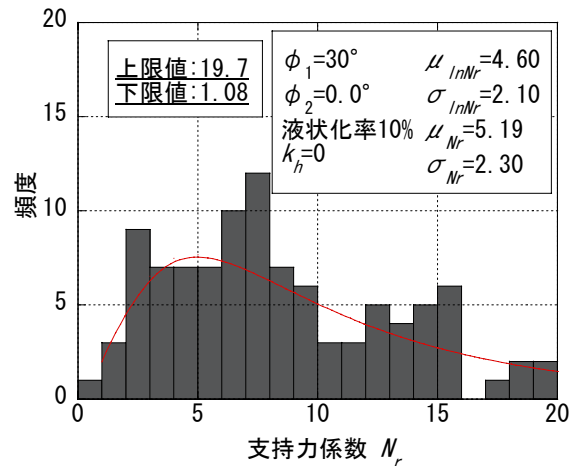


図-3 対数正規分布とヒストグラム
($k_h=0$, 液状化率 10%)

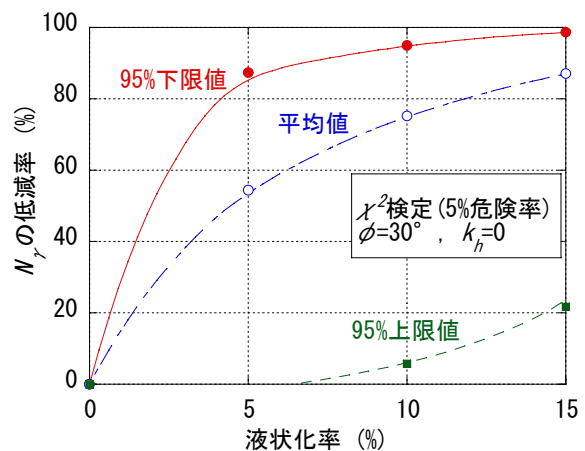


図-4 低減率と液状化率の関係
($k_h=0$)

た場合の 95%信頼性上限値・下限値を用いて計算した。さらに用いた液状化率は、 P_L や F_L などの液状化の程度を表す指標と関連させる必要があると思われる。液状化部と非液状化部の F_L 値をそれぞれ 0 と 1.0 を仮定すると、液状化率は P_L 値と等しいことになる。平均値で計算した低減率に着目すると、液状化率($P_L=15$)が 15%のとき、低減率は 87.1%であった。従って、液状化率が 15%に達すると、支持力はほとんどない状態と推測される。

次に、地盤の水平震度および地盤の液状化率が地盤の支持力に与える影響を評価するために、液状化率ごとの支持力係数と水平震度の関係を図-5 に示す。液状化率の値によらず、水平震度が増加するにつれて支持力係数は緩やかに減少した。また、地盤中に局所的な液状化が生じて、その割合に関わらず、ほぼ同様の減少傾向を示した。水平震度と地盤の局所的な液状化の影響度合いを比較すると、地盤の局所的な液状化のほうが、支持力の低減に与える影響は大きいと考えられる。

水平震度と液状化による支持力の低減を評価するため、図-6 に、液状化時における水平震度と支持力低減率との関係を示す。ここでも、低減率の計算には、モンテカルロ・シミュレーションより得られた支持力係数 N_y の平均値から計算した。グラフより、液状化率が小さいほど低減率の増加の程度は大きい。つまり、液状化を考慮しない地盤における水平震度 $k_h=0.2$ での支持力低減率と、水平震度なしの条件で液状化率 5%の支持力低減率が、ほぼ同程度であることから、水平震度が小さい領域においては地盤の局所的な液状化が支持力の低減に与える影響は大きいと考えられる。

図-7 に、液状化地盤における破壊モードの図を示す。

図-7 a) に、図-1 a) に示したメッシュ図を、図-7 b) に水平震度なし($k_h=0$)における地盤変形図、図-7 c) に、塑性領域および節点のベクトル図を示す。このケースによる支持力係数は、 $N_y=5.24$ で、平均支持力係数 $\mu_{N_y}=5.19$ とほぼ等しい結果が得られたメッシュパターンであった。すべり線が明確に形成されないまま、わずかな変形量で塑性状態に達した。

水平震度なし($k_h=0$)、液状化率 10%において最も支持力係数が大きくなったメッシュ図を図-8 a) に、そのときの変形図と塑性領域および節点のベクトル図を図-8 b), c) に示す。このとき、 $N_y=11.0$ であった。

両者とも、液状化部はメッシュ全体に一樣に広がっており、基礎直下の液状化部の要素数も等しい。さらに、地盤表面でもほぼ同様な変形をしているが、塑性領域の面積が大きく異なる。これより、液状化率が等しく、地盤表面での塑性化の程度が同じレベルであっても、支持力が大きく異なり、地盤内部での塑性化の程度にも大きな差が生じることが推測される。この違いは、液状化部

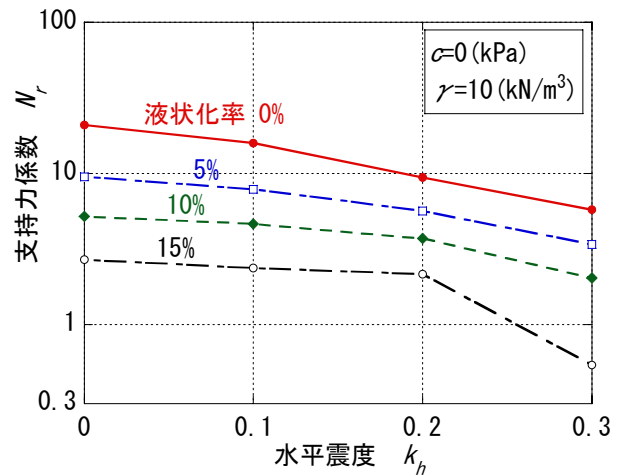


図-5 水平震度と支持力係数の関係

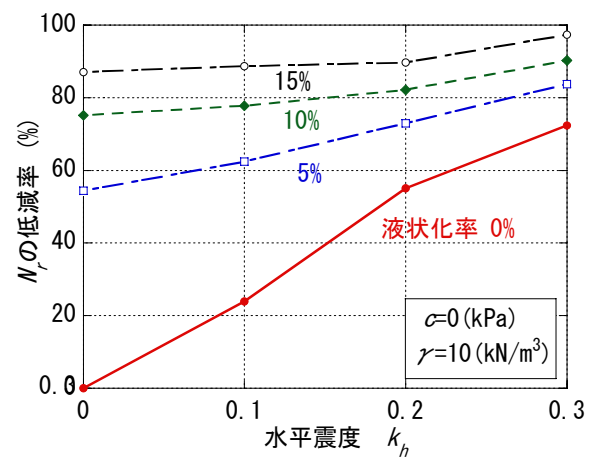
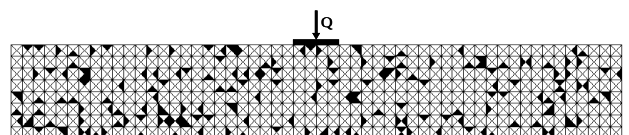
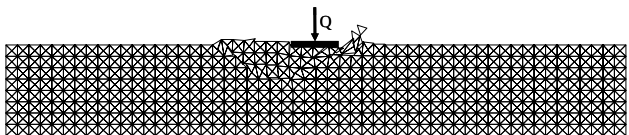


図-6 液状化時の水平震度と支持力低減率の関係

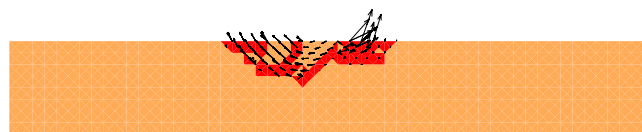


a) メッシュ図

$N_y=5.24$



b) 変形図



c) 塑性領域およびベクトル図

図-7 変形図、塑性領域とベクトル図

の要素の位置関係が原因と考えられる。特に、今回のケースでは、図-7 a)の方で基礎直下と基礎の左下に液化化部が集中していたことが原因として考えられる。

4. まとめ

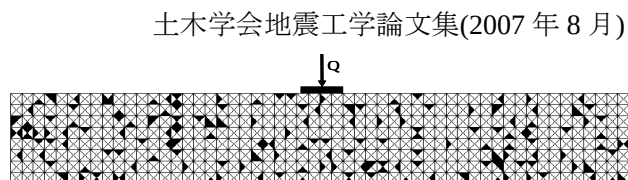
今回行った二次元平面ひずみ状態における局所的な地盤の液化化を考慮した数値極限解析の結果から、得られた結論をまとめると以下ようになる。

- (1) 液化化の局所性を有する地盤の支持力係数の分布形は、 χ^2 検定から対数正規分布で近似できた。
- (2) 液化化率0~15%の範囲内において、液化化率の増加にともなう支持力の低減は、顕著であった。例えば、液化化率が5%増加すると支持力はおおよそ50%に減少した。
- (3) 液化化部の位置のパターンによって、支持力および破壊モードが大きく異なる。

今後は、本成果をもとに三次元的な観点から局所的な液化化の影響を検討していきたい。

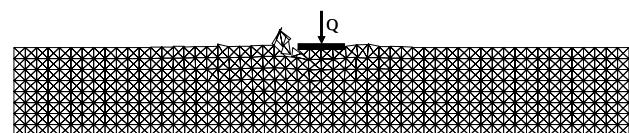
参考文献

- 1) (財)沿岸開発研究センター：海上工事における深層混合処理工法技術マニュアル，pp. 1226, 1999.
- 2) (財)日本建築センター：建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—，pp. 1—473, 1997.
- 3) Casciaro, R. and Cascini, L. (1982) : 'A mixed formulation and mixed finite elements for limit analysis', *Int. j. numer methods eng.*, **18**, 211-243.
- 4) Sloan, S. W., & Kneeman, P. W. (1995): "UPPER BOUND

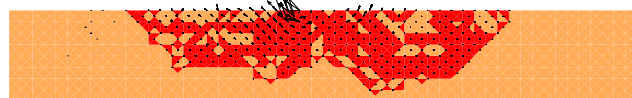


a) メッシュ図

$N_y=11.0$



b) 変形図



c) 塑性領域およびベクトル図

図-8 変形図，塑性領域とベクトル図

LIMIT ANALYSIS USING DISCONTINUOUS VELOCITY FIELDDES." *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **127**, 293-314.

- 5) Ukritchon, B., Whittle, A.J. & Klingvijit, C. (2003) "Calculations of bearing capacity factor, N_g , using numerical limit analyses," *ASCE Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, **129**(5), 468-474.
- 6) Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, 1943.

(2007.4.6 受付)

NUMERICAL LIMIT ANALYSES ON THE BEARING CAPACITY CONSIDERING THE LOCALITY OF LIQUEFACTION AND SEISMIC LOADING

Jun KUTSUNA, Kouki ZEN, Guangqi CHEN and Kiyonobu KASAMA,

In this paper, the locality of liquefaction in stabilized ground is expressed on the random theory and the bearing capacity under seismic loading is analyzed through Monte Carlo Simulation with Numerical Limit Analysis. The purpose of this paper is to clarify the effects of local liquefaction in ground and the pattern of liquefaction on the bearing capacity factor under seismic loading. As a result of this analysis, following conclusions were obtained. (1) The distribution of bearing capacity factor under seismic loading considering the locality of liquefaction can be expressed by log-normal function. (2) The bearing capacity factor under seismic loading decreases with the increasing the area of local liquefaction in ground and horizontal seismic coefficient. The liquefaction ground has no clear slip surface and comes to destruction with a little deformation. (3) The bearing capacity factor under seismic loading and the failure mode against seismic loading depend on the pattern of local liquefaction.